

原位置における固化処理地盤の強度評価法

In-Situ Strength Evaluation Method for Cement Treated Ground

笠 間 清 伸 (かさま きよのぶ)

九州大学助手 工学研究院建設デザイン部門

善 功 企 (ぜん こうき)

九州大学教授 工学研究院建設デザイン部門

江 頭 和 彦 (えがしら かずひこ)

運輸省第四港湾建設局 局長

佐 藤 孝 夫 (さとう たかお)

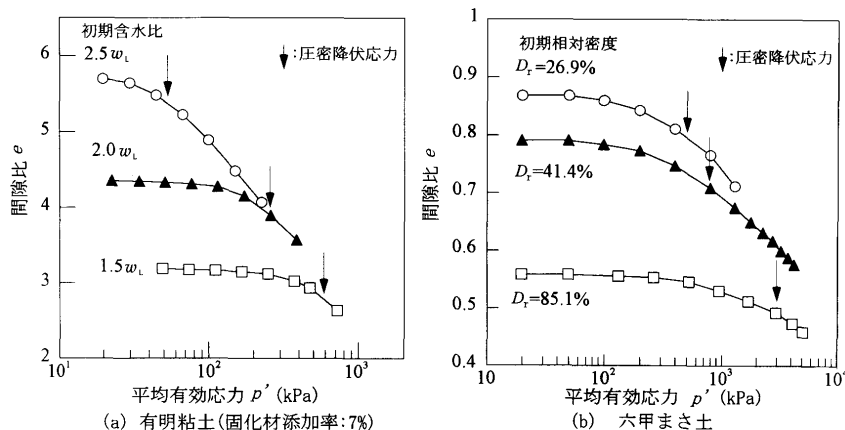
運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所 所長

1. はじめに

固化処理工法は、地盤の支持力増加やすべり防止、地盤の軽量化および液状化対策などを目的として、これまで幅広く用いられてきた。さらに、近年の高品質な固化処理地盤の施工技術の発展により、固化処理土は、今後目的や用途を広げつつ利用されることが予想され、従来にも増して経済性や合理的な設計法の確立が求められてくるものと考えられる。このような状況から、固化処理土の基本的特性の解明が精力的に進めら

れ、室内で作製された固化処理土の強度特性に関しては明らかになりつつある。そして現状では、原位置の固化処理地盤の強度は、室内で作製された固化処理土の強度特性を基準に評価されている。しかし、原位置における固化処理地盤の強度は、室内で作製した供試体のものとは異なり、①施工上生じる固化材の混合の不均一性と②固化対象となる地盤の土質の不均質性に起因する実質的な強度のばらつき、さらに③コア採取から室内試験にいたるまでに生じる乱れ等に起因する見かけ上の強度のばらつきを有する。そのため、依然として設計および施工のさいには、かなり安全側の強度の値を採用しており、固化処理地盤の強度が正しく評価されているのか明確でない上にコスト高につながっている。今後、①～③を解決し、より品質の高い固化処理地盤を造成していくには、固化処理土の強度に与える主要な影響因子を明確にした上で、原位置試験を利用した簡便かつ高精度な強度評価法を開発する必要がある。

このような背景から、固化処理土の強度に与える影響因子を明確にすることを目的として、固化処理土の母材(固化材を混合する前の土)、固化材添加率および混合時の母材の密度を変化させた供試体を対象に等方圧密試験および三軸圧縮試験を行った。その結果より、本文では固化処理土の強度に与える重要な因子として、降伏応力比の重要性を示し、降伏応力比を活用したより信頼性の高い原位置での固化処理地盤の強度評価法を提案する。



図一 1 固化処理土の等方圧密試験結果

2. 固化処理土の強度特性

2.1 供試体作製法および実験条件

実験に用いた固化処理土は、佐賀空港建設地より採取した有明粘土、秋田港の外港地区で採取された砂(以後、秋田外港砂と呼ぶ)および神戸南鈴蘭台で採取された細粒分をやや含むまき土(以後、六甲まき土と呼ぶ)を母材とした。有明粘土は、固化材として普通ポルトランドセメントを用い、セメントの混合量は、乾燥重量に対して添加率で5, 7, 10%とした。また、供試体の初期密度を変化させるために、固化材混合時の含水比を液性限界の1.5, 1.7, 2.0, 2.5倍に設定した。秋田外港砂および六甲まき土では、固化材は高炉スラグセメントB種を用い、固化材添加率5.5%とした。固化材混合後、3種の相対密度に調整することで、初期密度の異なる供試体を作製した。これら3種の固化処理土を28日間養生した後、等方圧密試験と圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。実験条件は、それぞれ文献1), 2)に詳しい。

2.2 圧密特性と圧密降伏応力

図一 1 (a), (b)は、有明粘土と六甲まき土の等方圧密時の間隙比 e と平均有効応力 p' の関係である。固化処理土は、母材の種類によらず圧密初期では緩やかに間隙比が減少するが、図一 1中の矢印の降伏点で折れ曲がり、その後急激に間隙比が減少している。また、初期密度の違いによらず、 e - $\log p'$ 曲線は、降伏後1本の線に漸近する。ここで、降伏点はCasagrande法により決定して

論 文

いる。秋田外港砂においても同様な結果が得られていることから、固化処理土の圧密特性は、未処理粘土の圧密特性に極めて類似しているといえる。ここで、固化処理土が、未処理粘土と同様の圧密特性を有するという立場に立てば、この降伏点の応力は圧密降伏応力と呼ぶことができ、処理土の強度特性は、降伏が生じるまでの応力状態と正規圧密状態とに分けて考えるべきことを示唆する。ただし、固化処理土は締固めや予圧密などを行っていないにもかかわらず、固化材の化学的な固結作用によって圧密降伏応力を有する点が未処理粘土と異なる特徴と言える。

2.3 非排水せん断時の破壊包絡線

図-2は、固化処理土の非排水せん断時の最大軸差応力と圧密圧力で表した破壊包絡線である。図-2(a)中の矢印は、等方圧密試験から求めた圧密降伏応力である。図-2(b)の六甲まき土と秋田外港砂の試験結果は、善ら²⁾によって報告されたデータを用いている。固化処理土の破壊包絡線の形状は、未処理粘土と同様に圧密降伏応力を境にして変化する。つまり、非排水せん断強度は、圧密圧力の増大によって圧密降伏応力以下の応力域では徐

々に増加するが、正規圧密領域ではより急勾配をもって増加する。また、破壊包絡線は同じ固化材添加率にもかかわらず、処理土の密度の増加とともに上側へ平行移動し、母材の違いによらず、その勾配はほぼ等しい。固化処理土は、固化材添加率の増加および母材の密度の増加(含水比の低下)により、圧密降伏応力が増大するため、ほとんどの破壊包絡線が圧密降伏応力以下の状態になるのが特徴である。このことは、固化処理土の強度評価には、降伏応力以下の応力状態における強度の評価が重要であることを意味する。

2.4 固化処理土の強度支配因子

本節では、固化処理土の強度に与える影響因子を明確にすることを目的として、固化処理土の非排水せん断強度 $s_u(q_{max}/2)$ を圧密応力 p_c' で正規化した強度増加率 s_u/p_c' に着目して、固化処理土の強度特性を検討する。

固化処理土の非排水せん断強度にあたる固化材混合時の母材の密度の影響を評価するために、有明粘土を母材とした固化処理土の s_u/p_c' を初期含水比 w_0 に対してプロットしたのが図-3である。図-3中には、圧密降伏応力以下の応力状態を表すために、次式で定義される降伏応力比 R を示している。

$$R = p_y'/p_c' \quad \dots\dots\dots (1)$$

式(1)中の p_y' は圧密降伏応力、 p_c' は非排水せん断時の圧密圧力である。この値は、未処理粘土という過圧密比

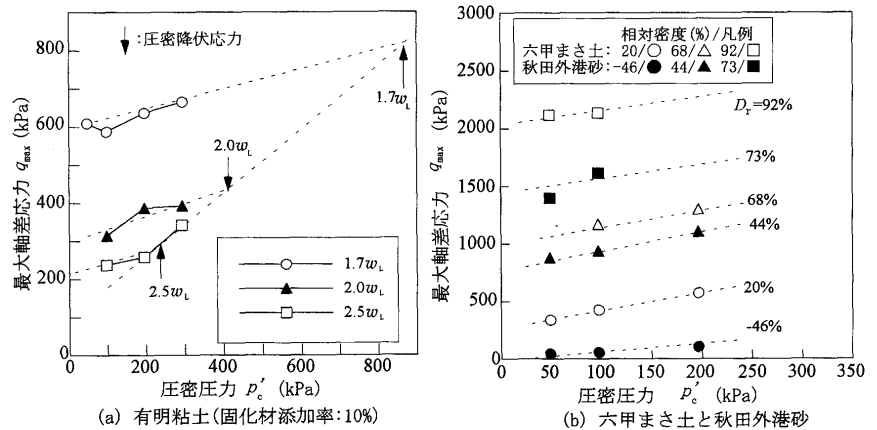
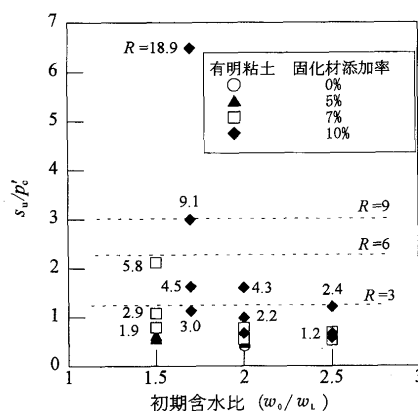
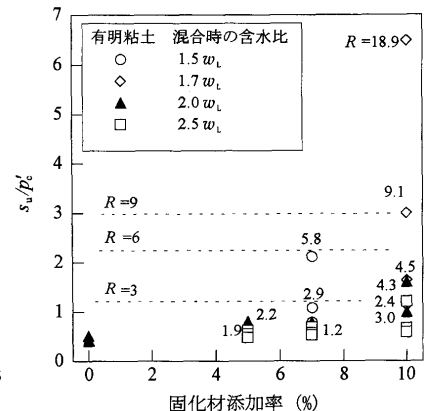
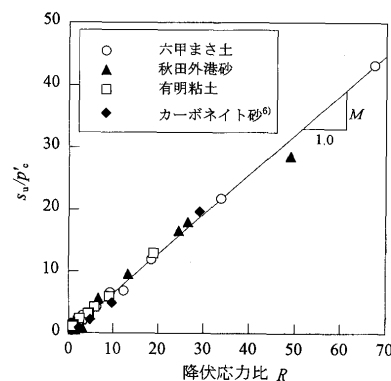


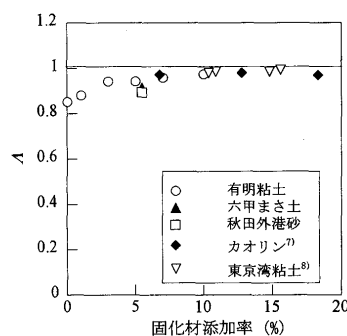
図-2 固化処理土の破壊包絡線

図-3 初期含水比に着目した s_u/p_c' 図-4 固化材料添加率に着目した s_u/p_c'

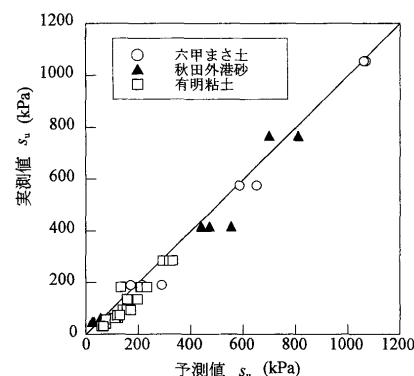
に相当する。図-3より、 s_u/p_c' の値は、固化材混合時の母材の密度にはあまり影響を受けず、主に降伏応力比に大きく依存していることが分かる。さらに、図-4には、 s_u/p_c' を固化材添加率に対してプロットしているが、同様に s_u/p_c' の値は固化材添加率の影響もほとんどないことが分かる。最後に、 s_u/p_c' を降伏応力比 R に対してプロットしたのが図-5である。図-5より明らかなように s_u/p_c' の値は、固化材混合時の母材の密度と固化材添加率によらず降伏応力比によって一義的に評価することができる。また、図-5中には、秋田外港砂と六甲まき土および Huang ら³⁾によるカーボネイト砂を母材とした固化処理土の実験結果も同様にプロットしている。4種の固化処理土の結果が一致していることから、 s_u/p_c' の値と降伏応力比の関係は母材の種類にもよらず、傾きの等しい直線で表すことができる。この特性は、固化処理土の圧密降伏応力が、土粒子骨格が降伏する応力ではなく、固化材により発現する固結力が降伏する応力を表すものであるため、母材の違いによる圧密降伏応力の変化が生じず、図-5の関係が一致するものと考えている。したがって、固化処理土の強度増加率は、母材の密度、固化材添加率および母材の種類よりも、それらが複合して発現される降伏応力比の大きさによって大きく支配されると言える。



図—5 強度増加率と降伏応力比の関係



図—6 A と固化材添加率の関係



図—7 実測値と予測値の比較

3. 原位置における強度評価法の提案

以上の実験結果より、固化処理土の強度を決定する支配的な因子としての降伏応力比の重要性が示された。本節では、降伏応力比を取り入れたより簡便で信頼性の高い固化処理地盤の強度評価法を検討する。これまで未処理粘土の過圧密領域での非排水せん断強度の評価に関する研究は、Mitachi ら⁴⁾、Mayne⁵⁾および Murthy ら⁶⁾などによって行われている。固化処理土の非排水せん断特性を、未処理粘土の過圧密領域におけるものと同様に評価できると考えると、固化処理土の非排水せん断強度の増加率は、以下の式で表される。

$$\left(\frac{s_u}{p'_c}\right)_{\text{preyield}} / \left(\frac{s_u}{p'_c}\right)_{\text{nc}} = R^A; A = 1 - \kappa/\lambda \quad (2)$$

ここで、 λ と κ はそれぞれ正規圧密領域と弾性域における e - $\log p'$ 曲線の勾配である。図—6 には、これまで報告されている固化処理土に関して、計算した A の値をプロットしている。図—6 に示すように、固化材添加率が増加するほど固化処理土は脆性的な性質になり、 A の値はほぼ1.0に近づくことがわかる。このことは、図—5 で示した固化処理土の s_u/p'_c と R の関係がほぼ直線で近似できることを意味する。ここで、固化処理土の A の値を1.0と仮定し、正規圧密領域における強度増加率を M とおき、式(2)を整理すると、固化処理土の非排水せん断強度は、以下のような簡便な近似式を用いて表すことができる。

$$s_u = M \times p'_y \quad (3)$$

得られた式(3)の特徴は、母材の種類、固化材添加率および処理土の密度によらず、処理土の圧密降伏応力を求めることで非排水せん断強度が得られることである。図—5 中の s_u/p'_c と R の関係を直線回帰し M を0.32とし、式(3)を用いた強度予測値と実験値を比較したのが図—7 である。これより、式(3)は、十分な精度を持って、固化処理土の非排水せん断強度を予測できる。

以上より、式(3)と孔内水平載荷試験等の既存の原位置試験により測定した圧密降伏応力を用いることで、前述した①～③に起因する強度のばらつきの影響を反映でき、原位置における固化処理地盤の簡便で信頼性の高い強度評価ができるものと考えられる。今後は、模型実験や原位置試験を通して、本提案手法を検証していく予定

である。

4. ま と め

本文では3種の固化処理土を対象とした一連の実験を行い、母材の種類、固化材添加率および混合時の母材の密度に着目して実験結果を示し、その強度評価法に関して考察した。得られた結論をまとめると以下のようになる。1) 固化処理土は、固化材の固結効果によって発現する圧密降伏応力を有する。2) 固化処理土の強度特性は、未処理粘土と同様に、正規圧密領域と圧密降伏応力以下の応力域とに分割して評価できる。3) 固化処理土の非排水せん断強度は、降伏応力比に極めて大きく依存し、処理土の強度予測には、圧密降伏応力と降伏応力比の評価が重要である。4) 固化処理土の強度の重要な因子である降伏応力比を導入した簡便で信頼性の高い原位置での固化処理地盤の強度評価法を提案した。

参 考 文 献

- 1) 森嶋武宏・落合英俊・安福規之・笠間清伸：初期含水比に着目したセメント固化粘土の非排水強度特性，九州大学工学集報，第73巻，第2号，pp. 133～140, 2000.
- 2) 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰：事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性，港湾技術研究所報告，第29巻，第2号，pp. 85～118, 1990.
- 3) J. H. Huang and D. W. Airey: Effect of cement and density on an artificially cemented sand, Proceedings of the first International Conference on Hard Soils and Soft Rocks, pp. 553～560, 1993.
- 4) T. Mitachi and S. Kitago: Change in undrained shear strength characteristics of saturated remould clay due to swelling, Soils & Foundations, Vol. 16, No. 1, pp. 45～58, 1976.
- 5) P. W. Mayne: Cam-clay prediction of undrained strength, ASCE, Vol. 106, No. GT11, pp. 1219～1242, 1980.
- 6) M. Krishna Murthy, A. Sridharan and T. S. Nagaraj: Prediction of undrained strength of overconsolidated clays, Soils & Foundations, Vol. 22, No. 1, pp. 78～81, 1982.
- 7) 上 俊二・藤原東雄・竹内 潤・福田 靖・酒井敏明・柳原勝也：セメント系固化材により安定処理されたカオリン粘土の力学的性質，土木学会論文集，No. 582/Ⅲ-41, pp. 217～228, 1997.
- 8) CDM 研究会：セメント系深層混合処理工法 設計と施工マニュアル（設計・施工編），pp. 81～97, 1991.

(原稿受理 2000.12.11)